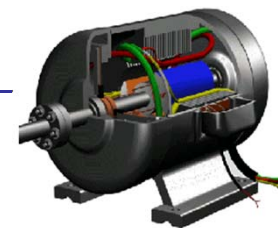


# 变压器的基本作用原理 与理论分析

东南大学电气工程学院  
黄允凯



东南大学  
电气工程学院



1 电力变压器的基本结构和额定值

2 变压器空载运行

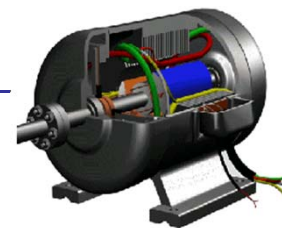
3 变压器负载运行

4 标么值

5 参数测定方法

6 变压器的运行性能





直流输电  
交流输电

380/220V、6、10、35、66、110、154、220、330、500kV，将来可能发展750~1000 kV或更高的电压等级

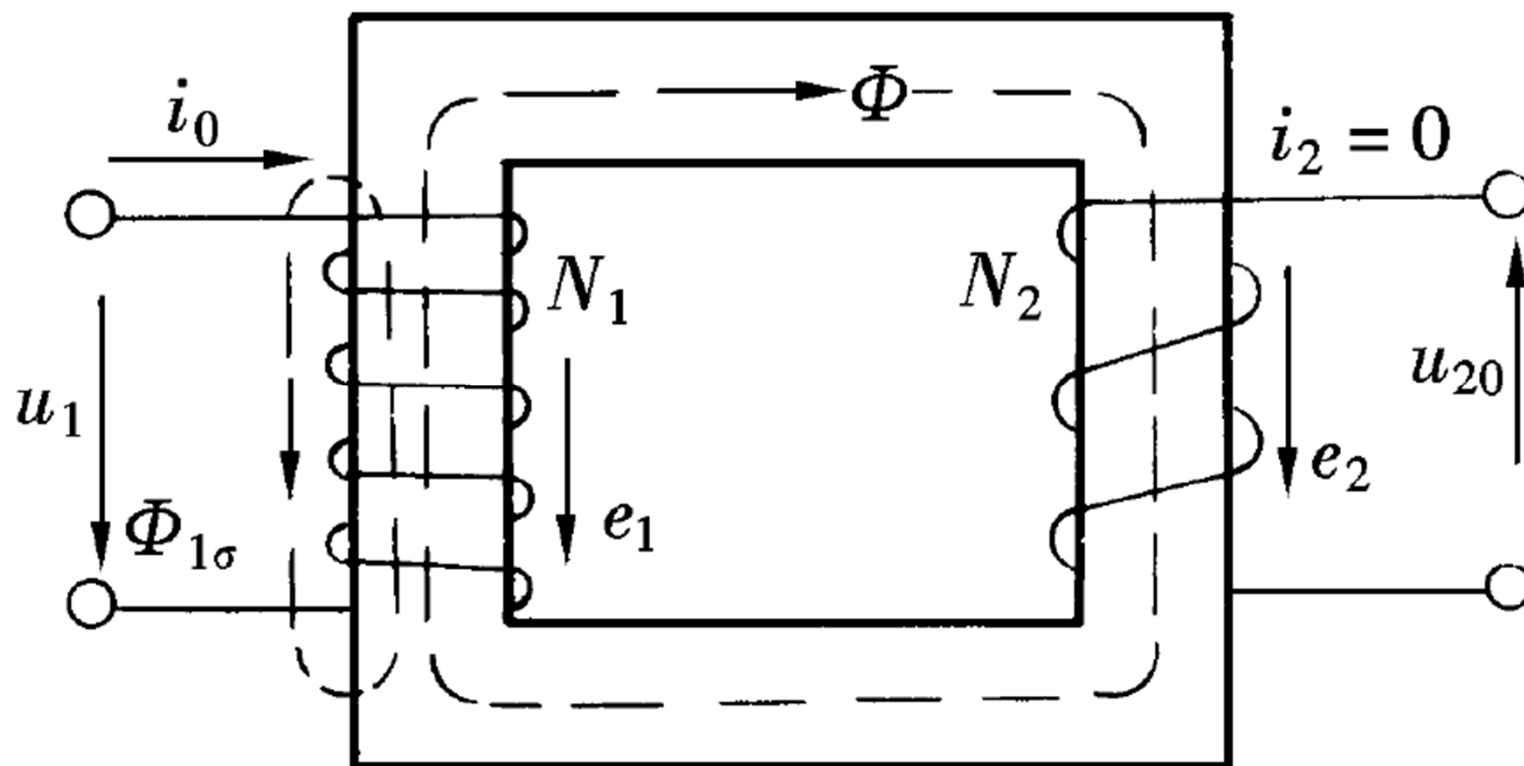
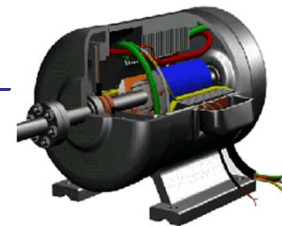
采用高电压输送电能有以下优点：

- 1、减少线路损耗；
- 2、提高送电功率；
- 3、输送距离远；
- 4、相对提高了线路安全性。

特高压直流输电（UHVDC）是指 $\pm 800\text{kV}$ （ $\pm 750\text{kV}$ ）及以上电压等级的直流输电及相关技术。特高压直流输电的主要特点是输送容量大、电压高



## 基本原理



原边绕组通入交流电

变化的磁通在原副边绕组中感应出电势

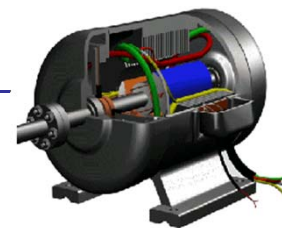
电流产生磁通，磁通随电流变化而变化

如果电流较小，电压之比约等于电势之比

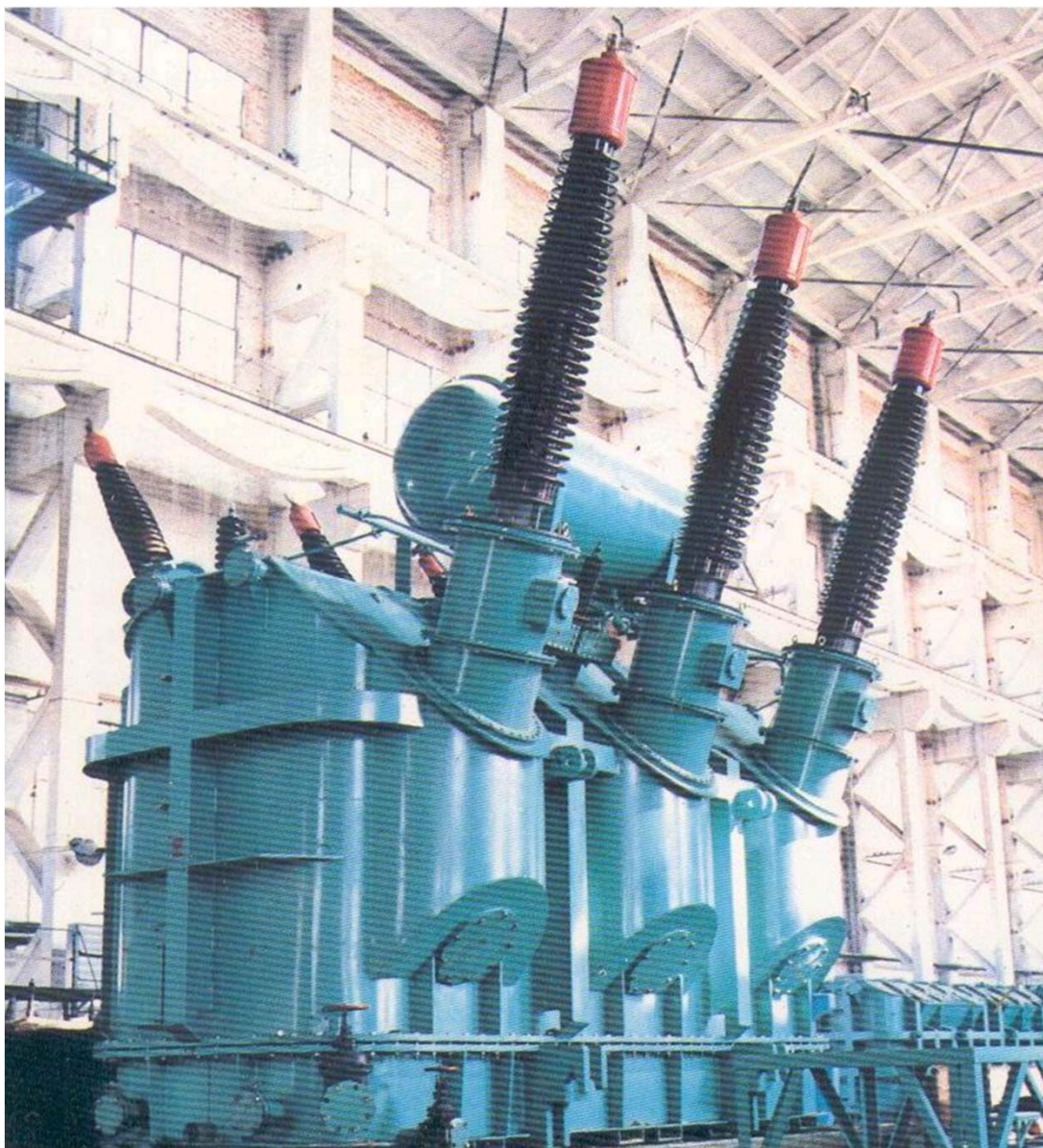


东南大学  
电气工程学院





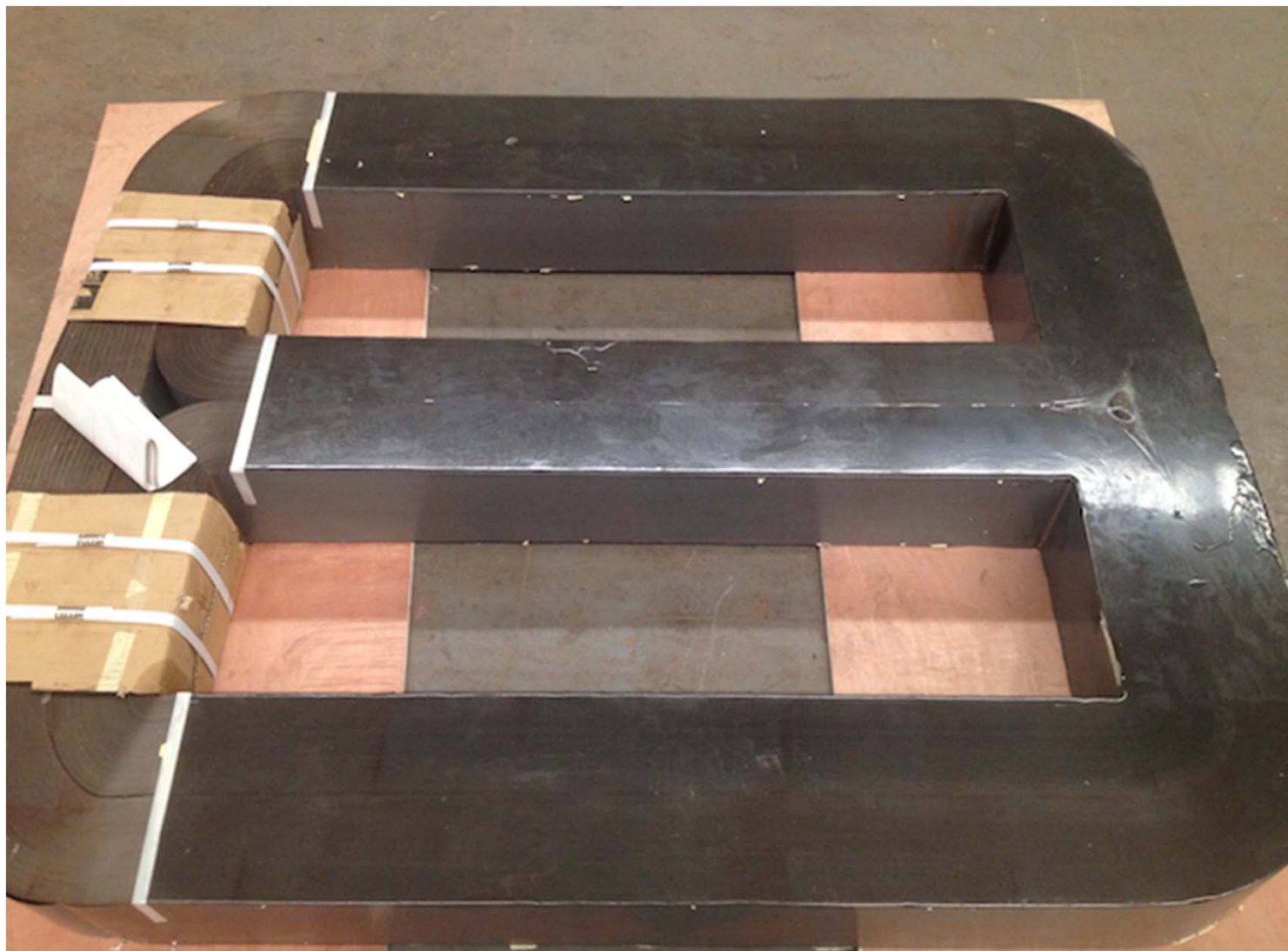
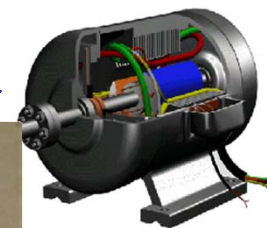
## • 电力变压器的基本结构



220kV变压器



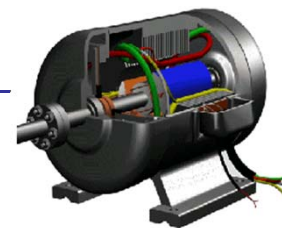
# 电力变压器的基本结构和额定值



变压器铁芯



东南大学  
电气工程学院



## ➤铁芯

硅钢片叠装而成， $0.2\text{mm}\sim 0.35\text{mm}$ 厚，通常为冷轧有取向

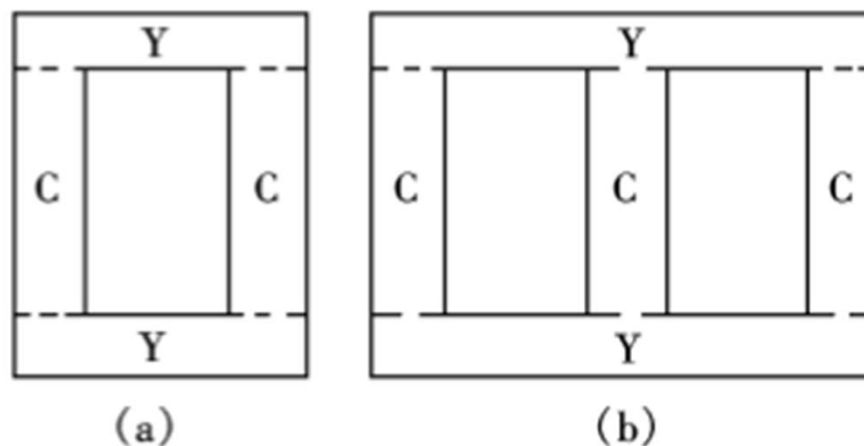


图 2-1 变压器的铁芯平面

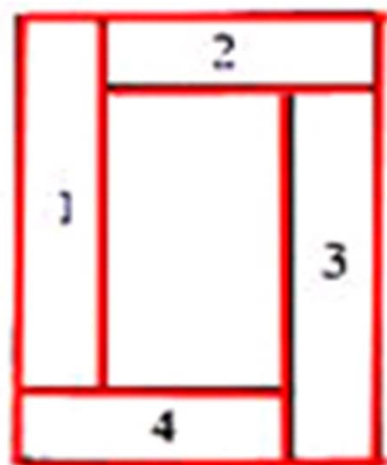
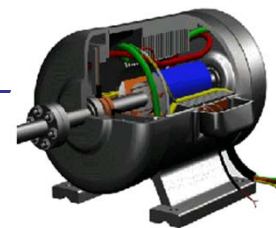
(a) 单相变压器；(b) 三相变压器

为了进一步降低空载电流、空载损耗，上层与下层叠片接缝错开，称为交叠装配

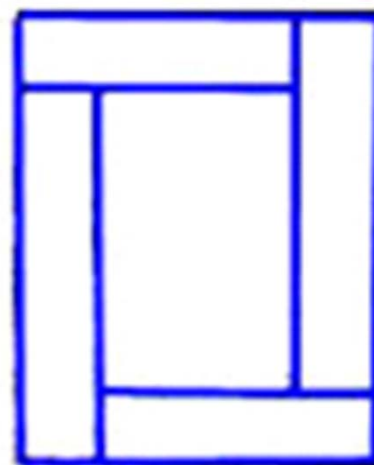




# 电力变压器的基本结构和额定值

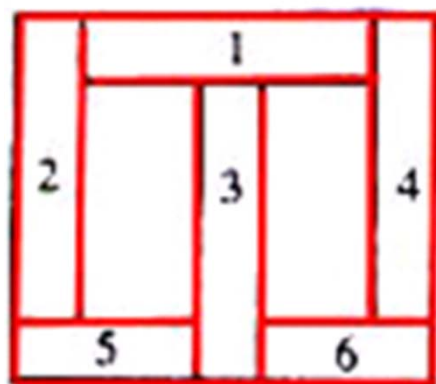


奇数层

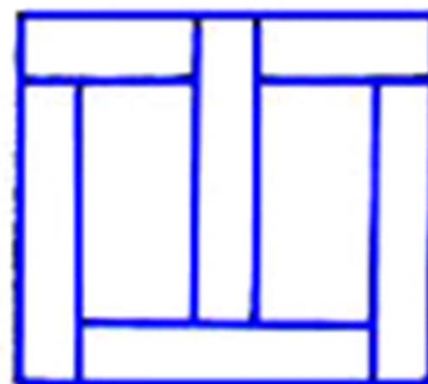


偶数层

单相，四片式铁芯交叠方法



奇数层



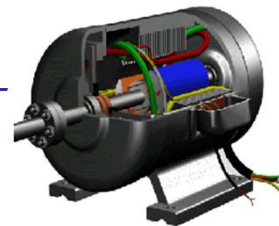
偶数层

三相，六片式铁芯交叠方法



东南大学  
电气工程学院





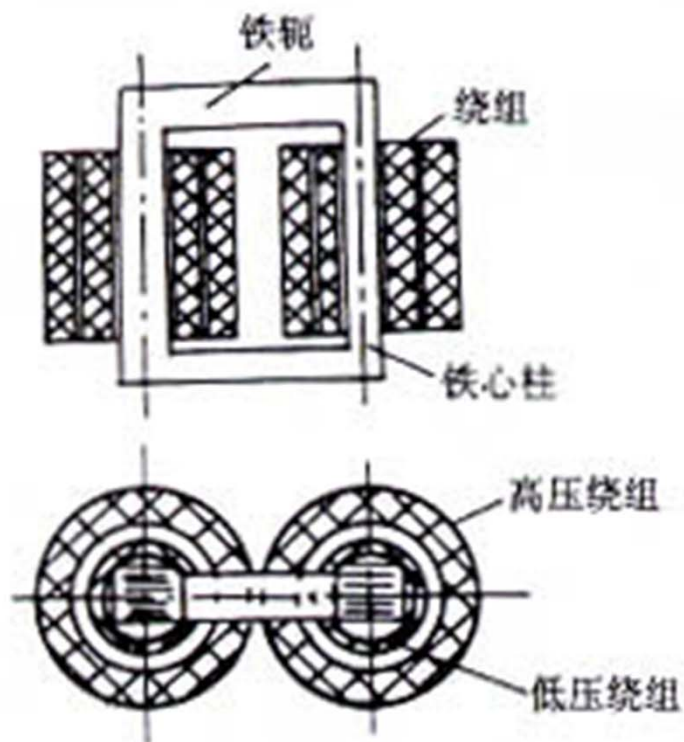
## ➤ 绕组

- 变压器绕组一般为绝缘扁铜线或绝缘圆铜线在绕线模上绕制而成。
- 为便于制造、在电磁力作用下受力均匀以及机械性能良好，绕组线圈作成圈形。
- 按照绕组在铁芯中的排列方法分类，变压器可分为铁芯式和铁壳式两类
- 基本型式：**同芯式，交叠式**

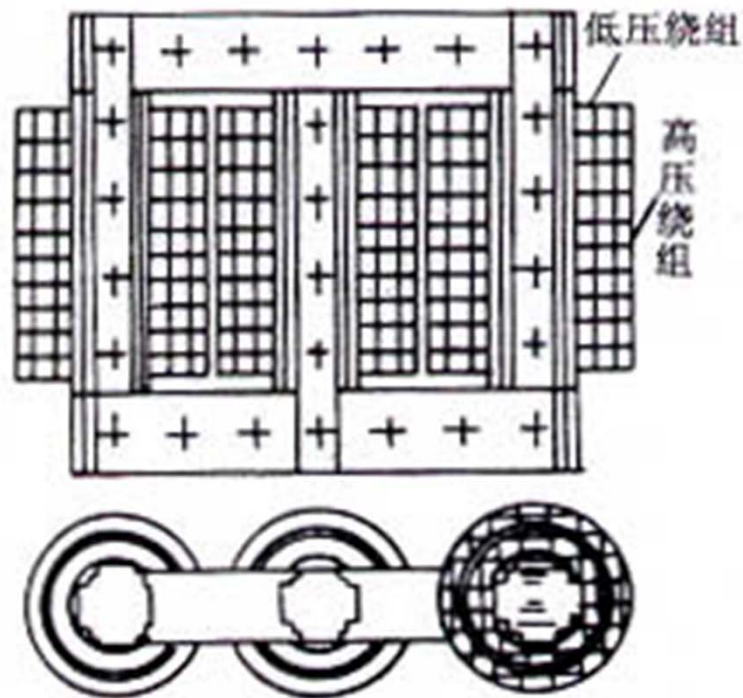
绕组**同芯**套装在变压器铁心柱上，低压绕组在内层，高压绕组套装在低压绕组外层，以便于绝缘。



# 电力变压器的基本结构和额定值



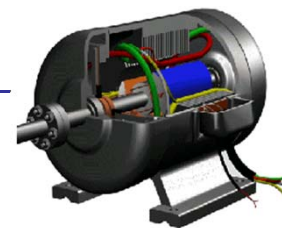
单相芯式变压器



三相芯式变压器

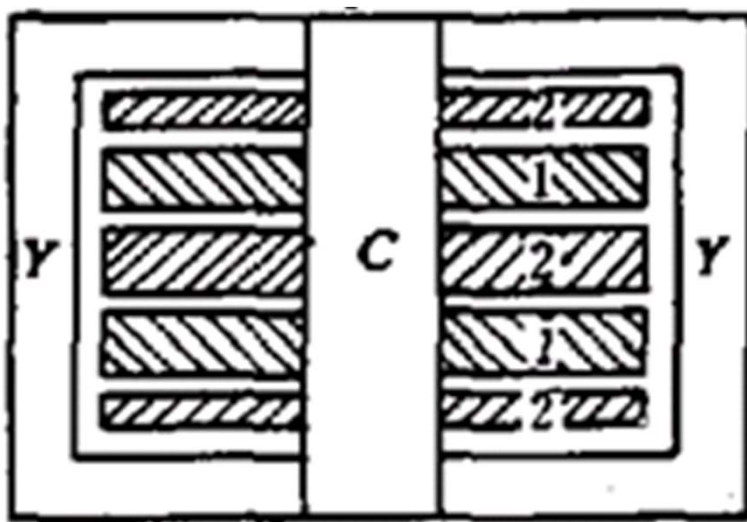
芯式变压器

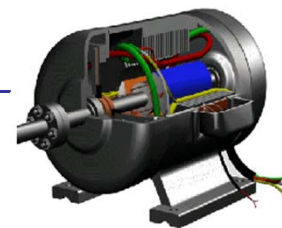




## 铁壳式变压器

- 变压器的铁芯柱在中间，铁轭在两旁环绕，且把绕组包围起来
- 结构比较坚固、制造工艺复杂，高压绕组与铁芯柱的距离较近，绝缘也比较困难
- 通常应用于电压很低而电流很大的特殊场合，例如，电炉用变压器。这时巨大的电流流过绕组将使绕组上受到巨大的电磁力，铁壳式结构可以加强对绕组的机械支撑，使能承受较大的电磁力。





### ➤ 变压器油

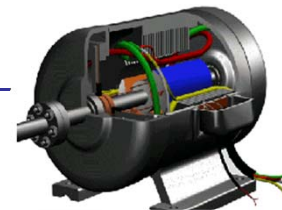
- 电力变压器绕组与铁心装配完后用夹件紧固，形成变压器的器芯。变压器器芯装在油箱内，油箱内充满变压器油。变压器油是一种矿物油，具有很好的绝缘性能。变压器油起两个作用：

①**绝缘**：绕组与绕组、绕组与铁心及油箱之间

②**散热**：热量通过油箱壳散发，油箱有许多散热油管，以增大散热面积。采用内部油泵强迫油循环，外部用变压器风扇吹风或用自来水冲淋变压器油箱



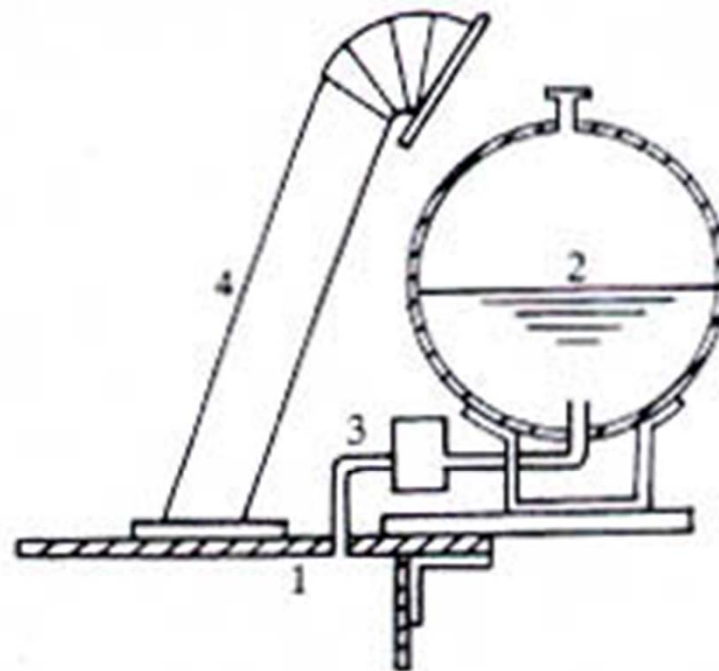




### ➤ 油箱

机械支撑、冷却散热、保护作用

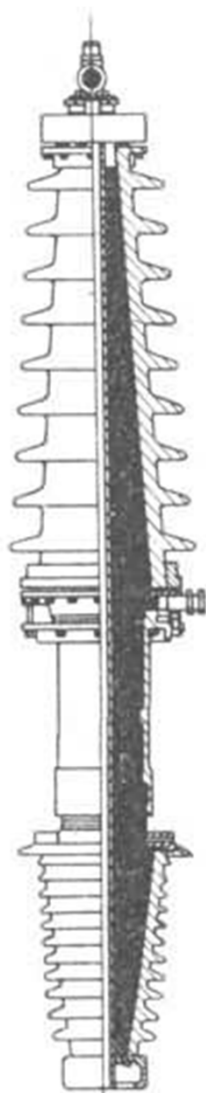
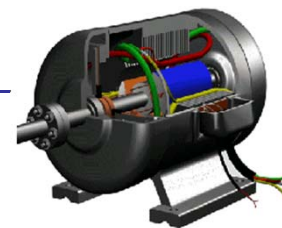
- 当变压器出现故障时，产生的热量使变压器油汽化，气体继电器动作，发出报警信号或切断电源。
- 如果事故严重，变压器油大量汽化，油气冲破安全气道管口的密封玻璃，冲出变压器油箱，避免油箱爆裂。



储油柜

1—主油箱；2—储油柜；  
3—气体继电器；4—安全气道



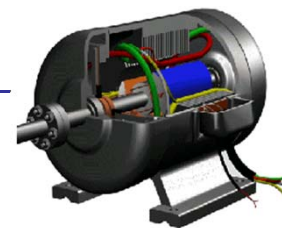


电容器  
式套管

## ➤ 绝缘套管

- 绝缘套管由中心导电杆与瓷套组成。导电杆穿过变压器油箱、在油箱内的一端与线圈的端点联接，在外面的一端与外线路联接。
- 在瓷套和导电杆间留有一道充油层——充油套管
- 当电压等级更高时，在瓷套内腔中常环绕着导电杆包上几层绝缘纸筒，在每个绝缘纸筒上贴附有一层铝箔，则沿着套管的径向距离，绝缘层和铝箔层构成串联电容器，使瓷套与导电杆间的电场分布均匀
- 套管外形常做成伞形，**电压愈高、级数愈多。**





## • 变压器的额定值

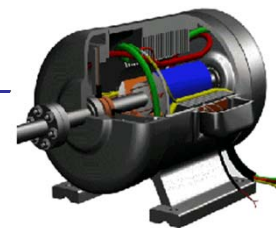
- 额定容量 $S_N$ ——制造厂所规定的在额定条件下使用时输出能力的保证值。单位为VA或kVA。对**三相变压器指三相的总容量**。
- 额定电压——由制造厂所规定的变压器在空载时额定分接头上的电压保证值。单位为V或kV。

当变压器初级侧在额定分接头处接有额定电压 $U_{1N}$ ，次级侧空载电压即为次级侧额定电压 $U_{2N}$ 。

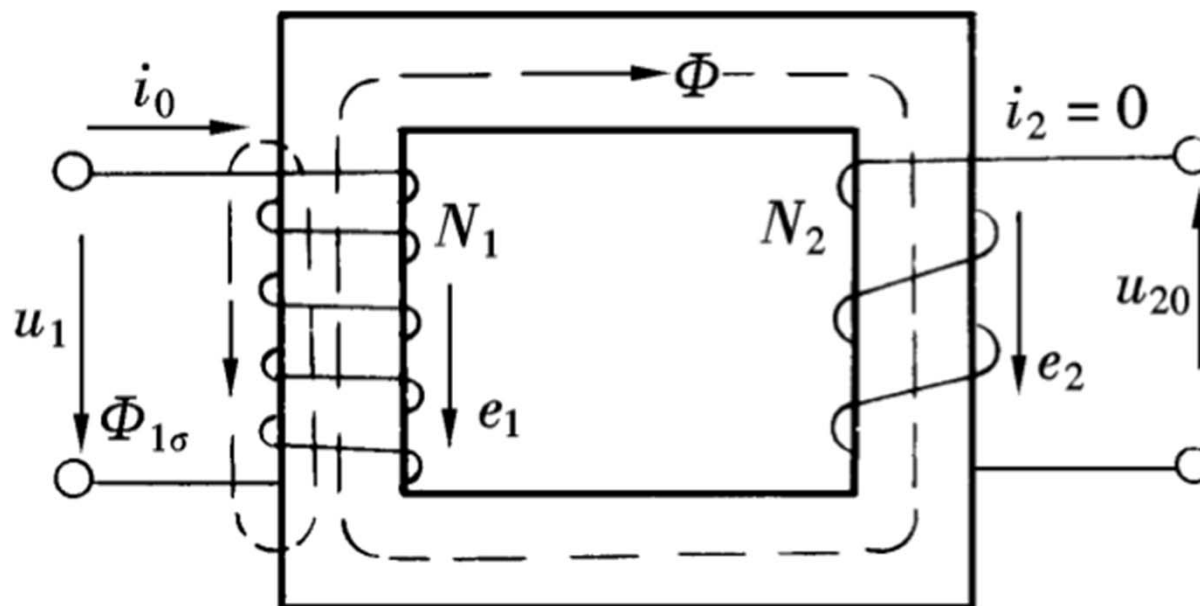
对三相变压器，铭牌上的额定电压指线电压

- 额定电流——额定容量除以各绕组的额定电压所计算出来的线电流值。单位用A或kA。
- 电力变压器的额定频率是50Hz





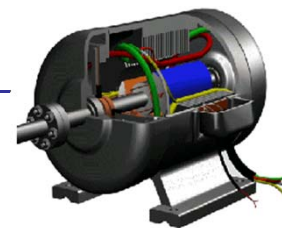
- 电磁物理现象



空载电流 $i_0$ ， $i_1 = i_0$ 。全部用以激磁——激磁电流 $i_m$ ， $i_0 = i_m$   
激磁电流产生激磁磁势 $i_m N_1$ ，建立交变磁场







## 分为主磁通和漏磁通两部分

### ①磁路不同，因而磁阻不同。

主磁通 $\Phi$ 同时交链初级、次级绕组，又称为互磁通，路径为沿铁芯而闭合的磁路，磁阻较小。

漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 只交链初级绕组，称初级侧漏磁通，它所行经的路径大部分为非磁性物质，磁阻较大。

### ②功能不同。主磁通通过互感作用传递功率，漏磁通不传递功率。

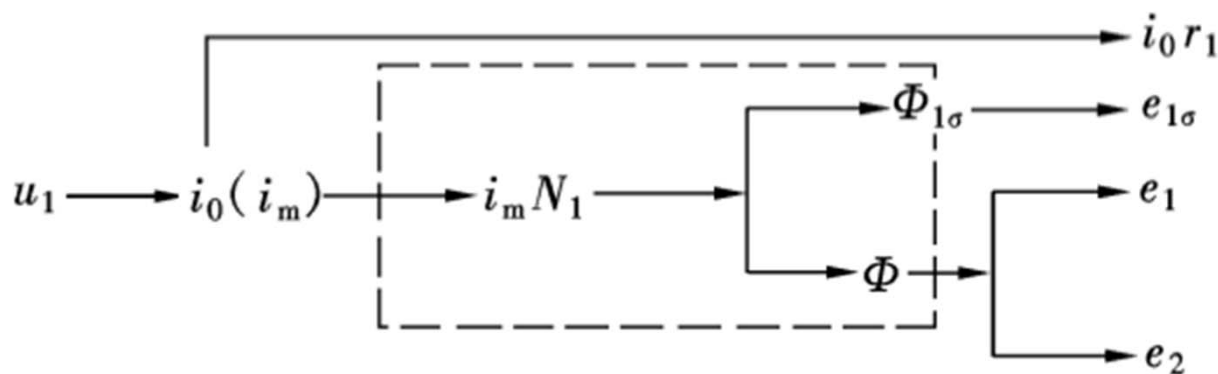
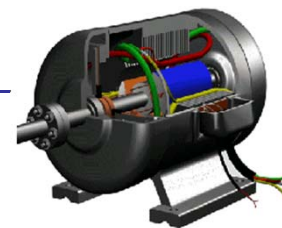


图 2-7 变压器空载时的电磁关系



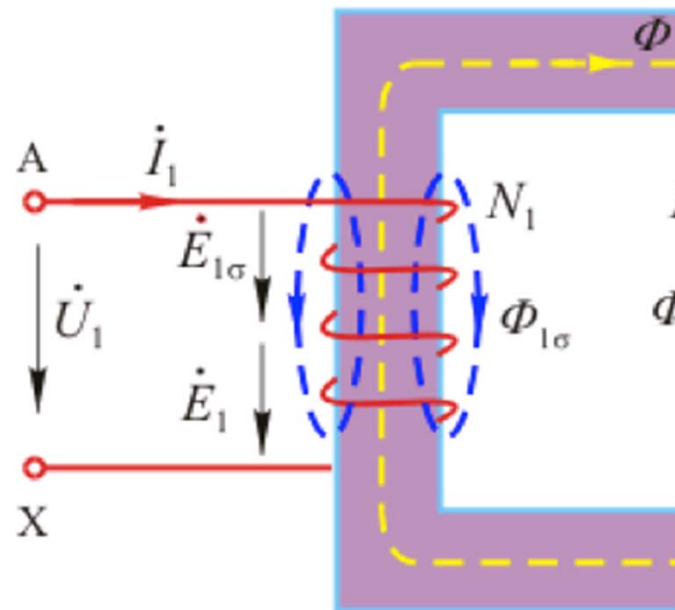


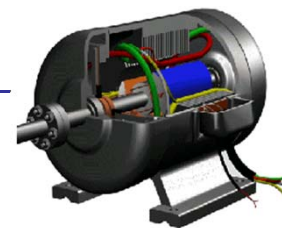
## • 正方向

- 箭头方向表示正方向
- 规定电流的正方向与该电流所产生的磁通正方向符合“右手螺旋”定则，规定磁通的正方向与其感应电势的正方向符合“右手螺旋”定则。
- 电流正方向与电势正方向一致。

e的正方向与电流同方向。这样

$$e_1 = -N_1 d\Phi/dt \text{ 成立}$$





## • 感应电动势、电压变比

主磁通  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$      $\Phi_m$  —— 磁通幅值

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_1 \text{幅值 } E_{1m} = N_1 \omega \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m$$

$$e_2 \text{幅值 } E_{2m} = N_2 \omega \Phi_m = 2\pi f N_2 \Phi_m$$

$$e_1 \text{有效值 } E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m$$

$$e_2 \text{有效值 } E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = \sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m$$

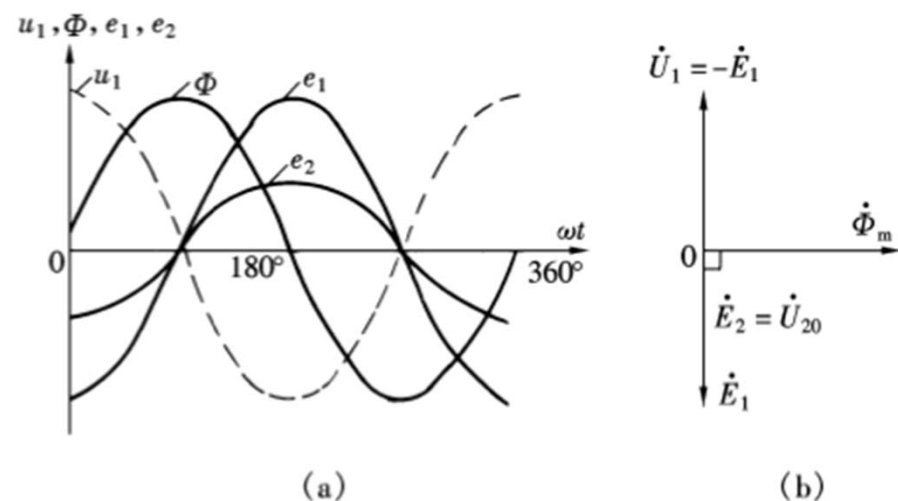
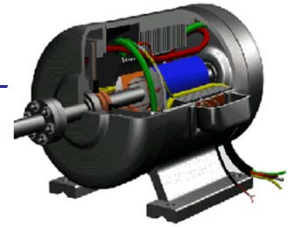


图 2-8 主磁通及其感应电动势

(a) 波形图；(b) 相量图



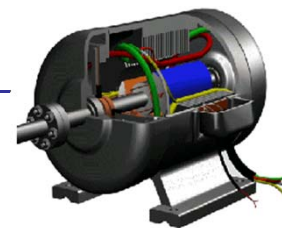


- 变比——**初级电压与次级空载时端点电压之比。**
- **电压变比k** 决定于初级、次级绕组匝数比。
- 略去电阻压降和漏磁电势

$$k = \frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$







- 励磁电流

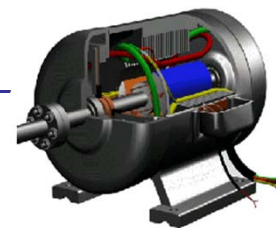
➤ 忽略电阻压降和漏磁电势，则  $U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ 。

$\Phi_m \propto U_1$  即：当外施电压  $U_1$  为定值，主磁通  $\Phi_m$  也为一定值

➤ 问题：一台结构已定的变压器当外施电压为已知，激磁电流由那些因素所决定？

答：决定于变压器的铁芯材料及铁芯几何尺寸。因为铁芯材料是磁性物质，励磁电流的大小和波形将受磁路饱和、磁滞及涡流的影响。





## (一)磁路饱和影响

- 当  $B_m < 0.8\text{T}$ ，磁路未饱和状态、磁化曲线  $\Phi = f(i)$  呈线性，导磁率是常数。
- 当  $\Phi$  按正弦变化， $i$  亦按正弦变化。

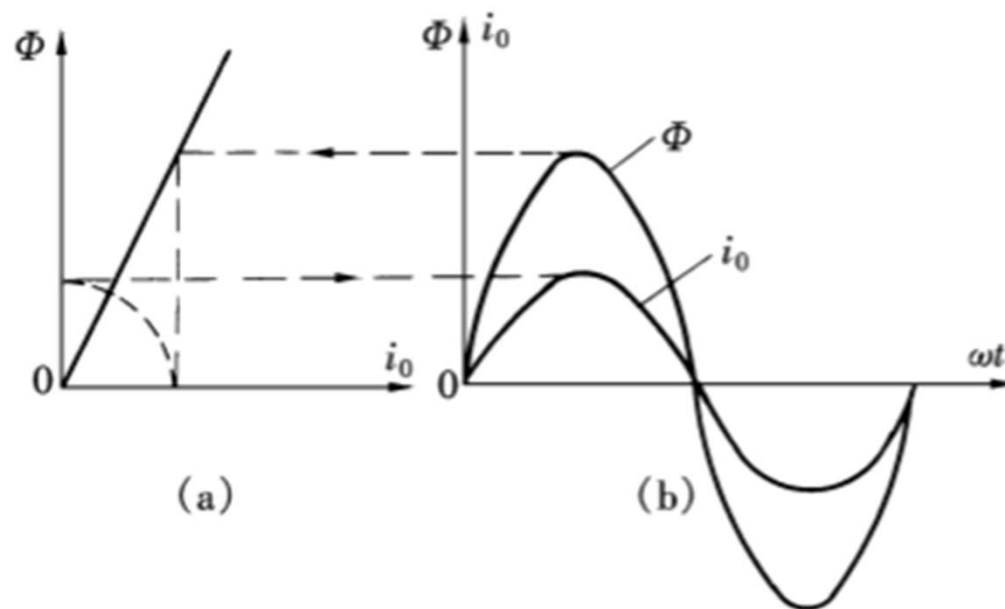
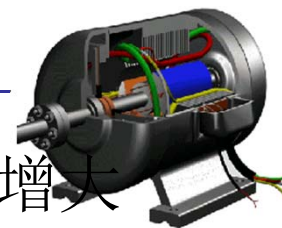


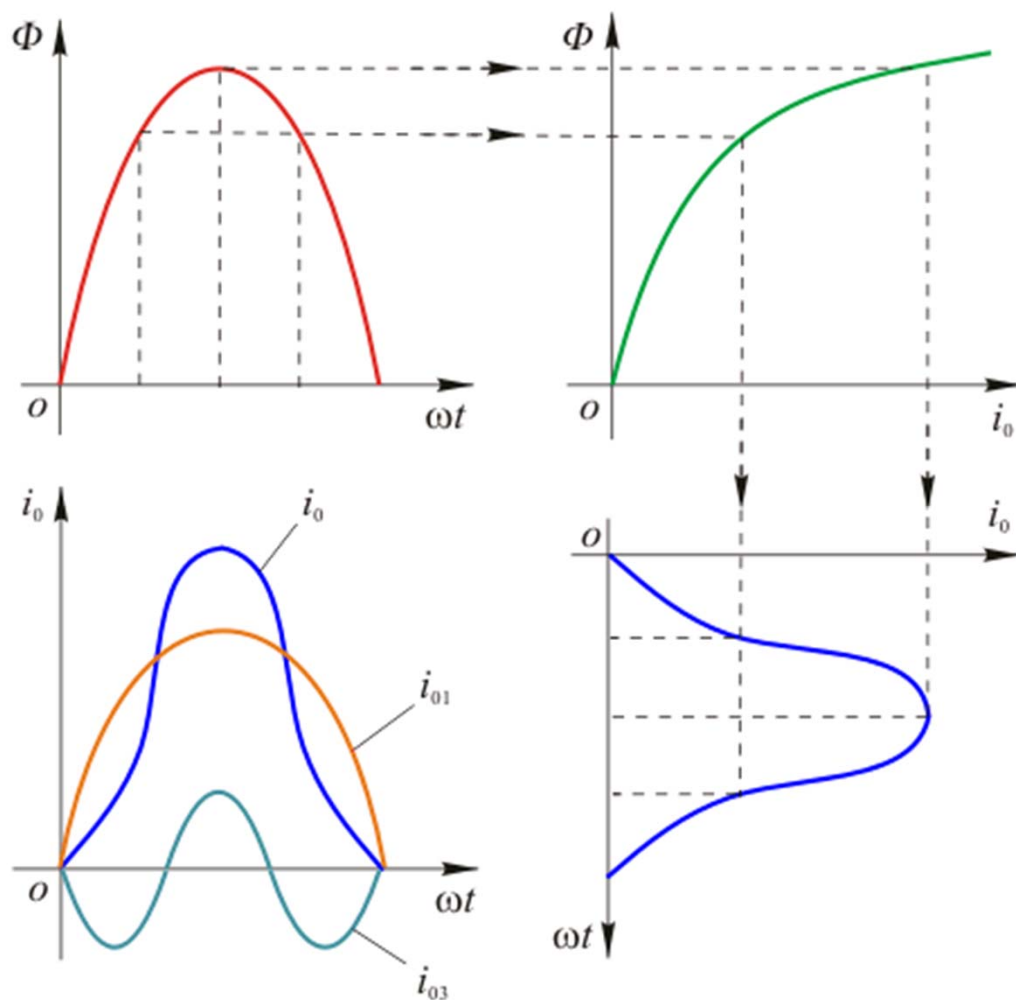
图 2-9 作图法求励磁电流（磁路不饱和，未考虑磁滞损耗）

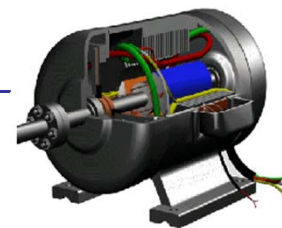
(a) 磁化曲线；(b) 磁通波和励磁电流波





- 如  $B_m > 0.8T$ ，磁路开始饱和， $\Phi = f(i)$  呈非线性，随  $i$  增大导磁率逐渐变小。磁通  $\Phi$  为正弦波， $i$  为尖顶波，尖顶的大小取决于饱和程度。



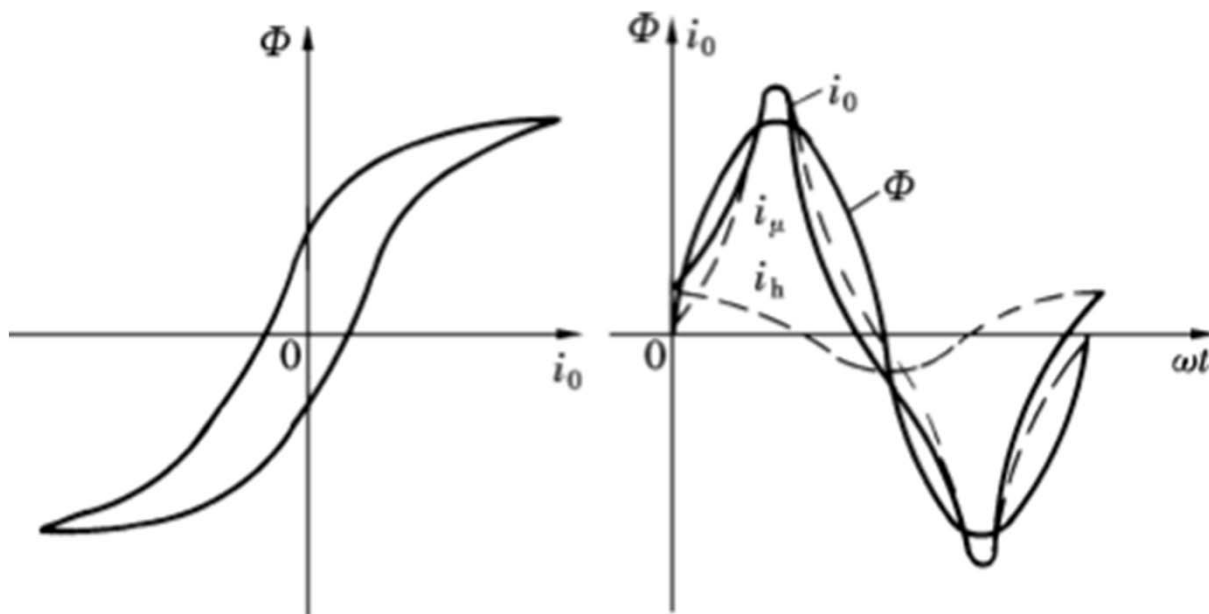


## (二) 磁滞现象的影响

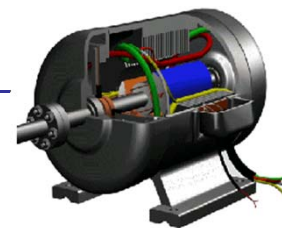
激磁电流是不对称尖顶波，把它分解成两个分量。

(1) 对称的尖顶波，它是磁路饱和所引起的，即磁化电流分量 $i_\mu$ 。

(2) 近似正弦波，电流分量 $i_h$ ，频率为基波频率，**磁滞电流分量**， $i_h$ 与 $-E_1$ 同相位，是有功分量电流。





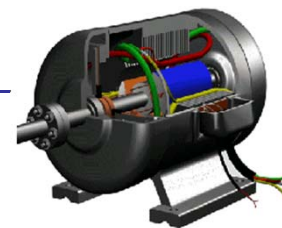


### (三) 涡流对励磁电流的影响

- 交变磁通在铁芯中感应电势，在铁芯中产生涡流及涡流损耗。**涡流电流分量** $I_e$ 由涡流引起的，与涡流损耗对应， $I_e$ 与 $-E_1$ 同相位。
- 由于磁路饱和、磁滞和涡流三者同时存在，激磁电流实际包含 $I_\mu$ 、 $I_h$ 和 $I_e$ 三个分量；又由于 $I_h$ 和 $I_e$ 同相位，合并称为**铁耗电流分量**，用 $I_{Fe}$ 表示。

$$\dot{I}_m = \dot{I}_u + \dot{I}_h + \dot{I}_e = \dot{I}_u + \dot{I}_{Fe}$$





## 励磁特性的电路模型

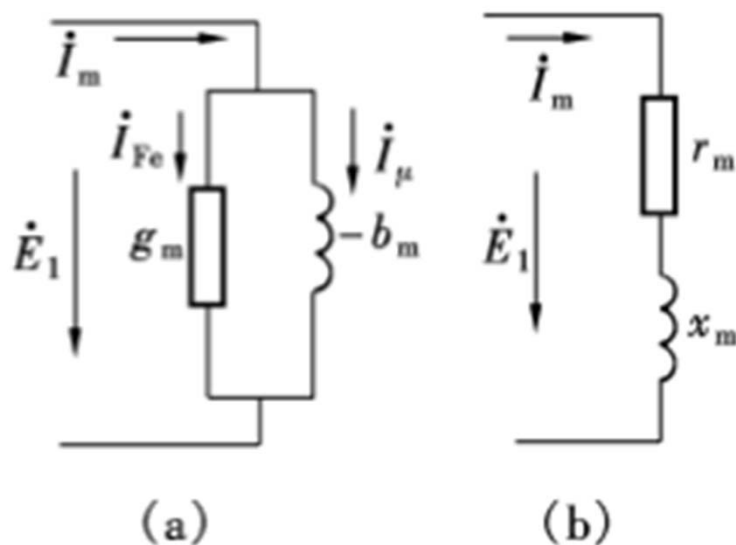


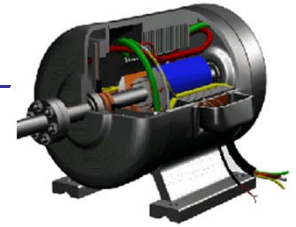
图 2-12 励磁等效电路

(a) 导纳电路；(b) 阻抗电路

强调： $r_m$ 并非实质电阻、是为计算铁耗引进的**模拟电阻**。由于磁化曲线呈非线性，参数 $Z_m$ 随电压而变化，不是常数。但变压器正常运行时，外施电压等于或近似等于额定电压，且变动范围不大，可把 $Z_m$ 看成常数。

$X_m$ 是主磁通 $\Phi$ 引起的电抗，为励磁电抗





## •漏抗

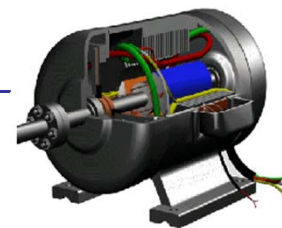
**描述漏磁电势的电路参数。**由于漏磁通所经路径主要为非磁性物质（空气），磁阻为常数。磁化曲线为直线，即漏磁通与产生该漏磁通的电流成正比且同相位，漏电感亦为常数

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{1\sigma} &= \Phi_{1\sigma m} \sin \omega t \\ L_{1\sigma} &= \frac{N_1 \Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2} I_1} \end{aligned} \right\}$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_1$$





- 空载电压方程、等效电路和相量图

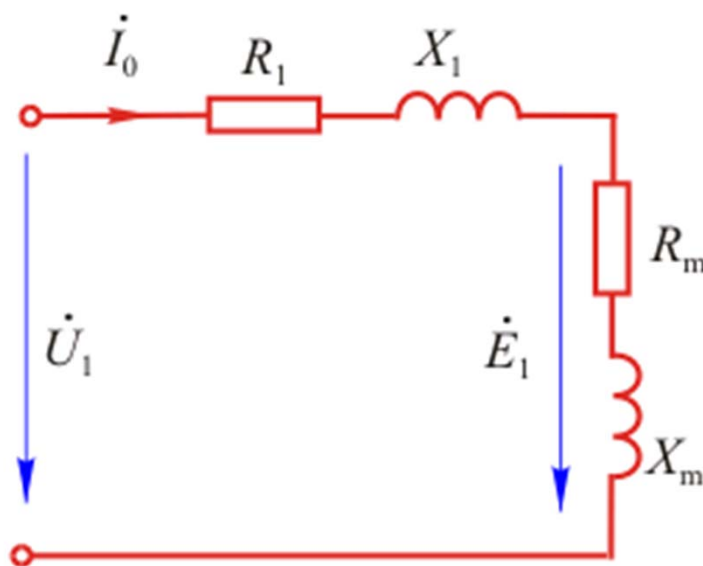
励磁电流  $\dot{I}_m = \dot{I}_{Fe} + \dot{I}_\mu = \dot{I}_0$

励磁支路电压降  $-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$

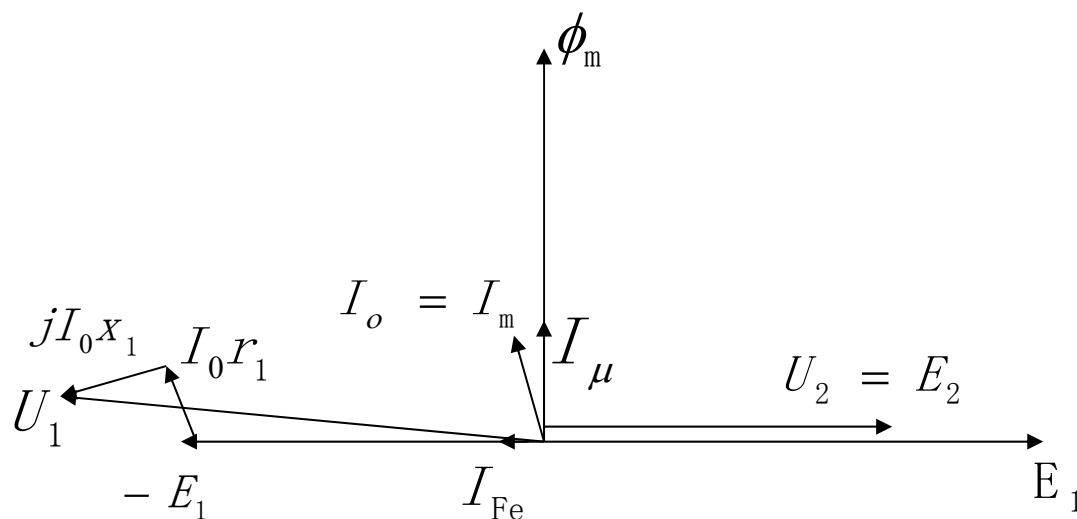
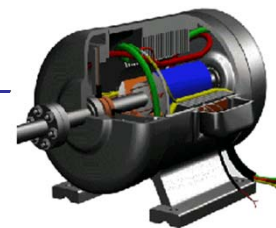
一次电压平衡方程  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$

二次电压平衡方程  $\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$

式中  $Z_1$ ——一次绕组漏阻抗,  $Z_1 = r_1 + jx_1$ 。



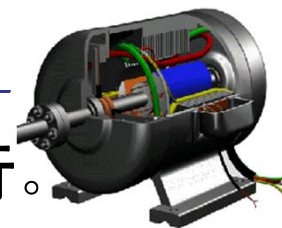
## 变压器的空载运行



- $U_2$  (参考方向)、 $E_2$
- $E_1$  与  $U_2$  方向一致
- $\Phi_m$  超前  $E_1$  90度
- $I_m$  超前  $\Phi_m$  一个角度
- $U_1$







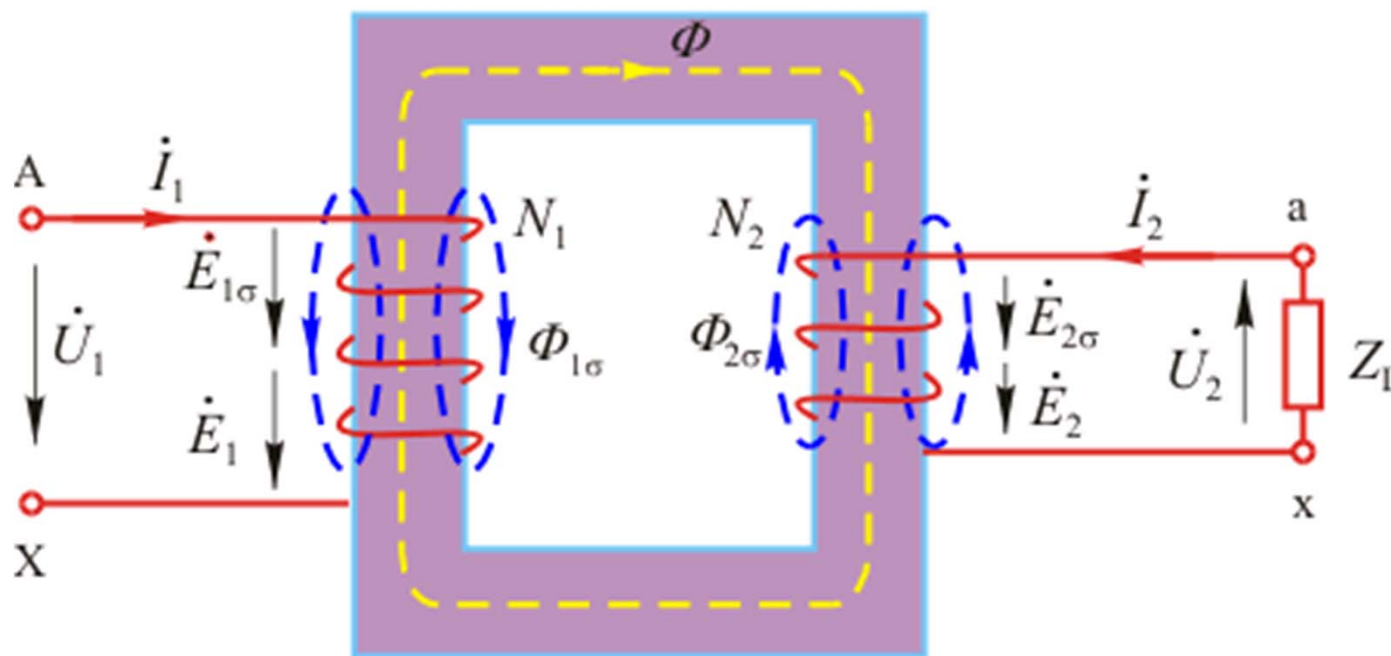
负载运行是指一侧绕组接电源，另一侧绕组接负载运行。

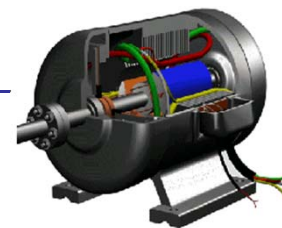
1 负载时的电磁物理过程

2 基本方程式

3 归算

4 归算后的分析





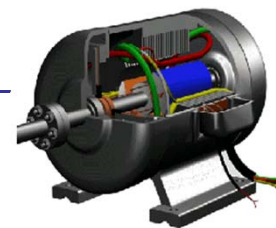
### •电磁物理现象

次级电流的存在、建立起次级磁势，它也作用在铁芯磁路上。改变了原有的磁势平衡状态，迫使主磁通变化，导致电势也随之改变。电势的改变又破坏已建立的电压平衡，迫使原电流随之改变，直到电路和磁路又达到新的平衡为止。

(磁势平衡式) 
$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_m N_1$$

**负载时作用在主磁路上的全部磁势应等于产生磁通所需的励磁磁势。**





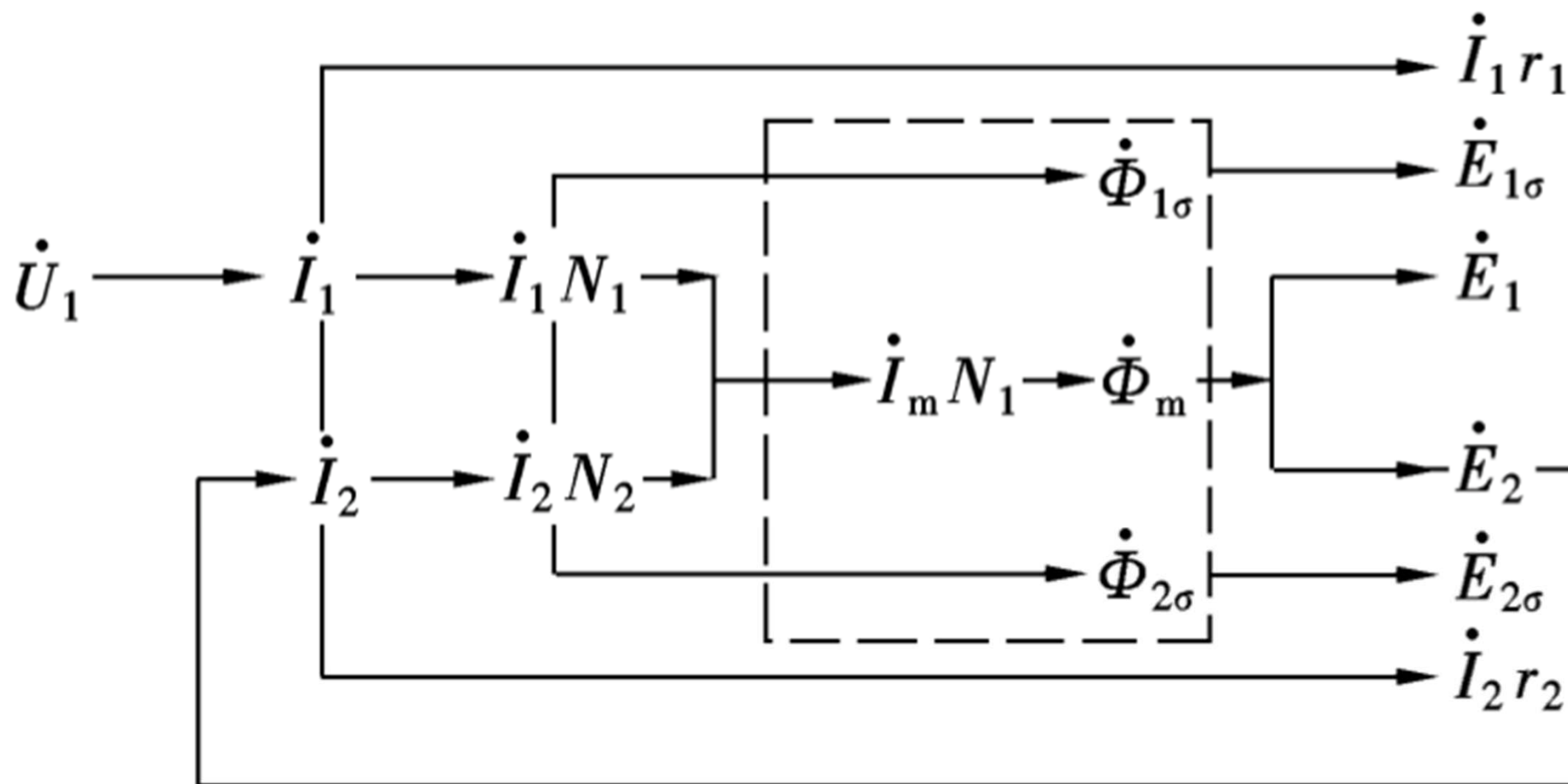
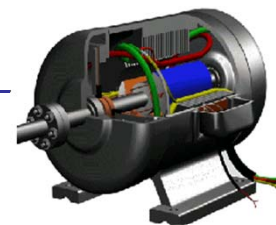
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left( -\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

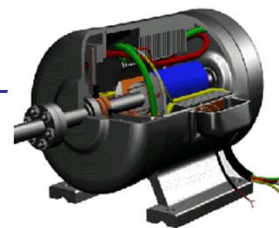
- 表明当有负载电流时。初级电流 $I_1$ 应包含有二个分量。其中 $I_m$ 用以激励主磁通。 $I_{1L}$ 所产生负载分量磁势 $I_{1L}N_1$ ，用以抵消次级磁势 $I_2N_2$ 对主磁路的影响。
- 励磁电流的值决定于主磁通 $\Phi_m$ ，即决定于 $E_1$ 。

$$I_{1L}N_1 + I_2N_2 = 0$$



## 变压器的负载运行





- 基本方程式

磁动势平衡

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1$$

电流表示式

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left( -\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right)$$

励磁支路电压降

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$$

一次电压平衡式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

二次电压平衡式

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

电压变比

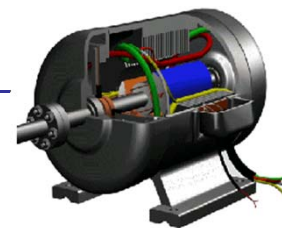
$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

负载电路电压平衡式

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$







- 归算

- **绕组归算**——用一假想的绕组替代其中一个绕组使成为 $k=1$ 的变压器。
- 归算量在原符号加上标号 ' 区别，归算后的值称为归算值或折算值。

原则：归算不改变实际变压器内部的电磁平衡关系

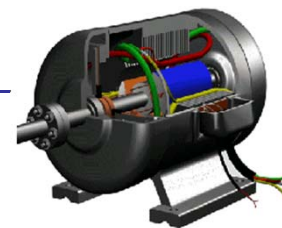
## 次级侧归算到初级侧

- 保持初级绕组匝数 $N_1$ 不变。设想有一个匝数为 $N'_2=N_1$ 的次级绕组，用它来取代原有匝数为 $N_2$ 的次级绕组。满足变比：

$$k = N_1 / N'_2 = 1。$$

## 初级侧归算到次级侧





### ➤ 电流的归算

归算前后磁势应保持不变

$$I_2' N_2' = I_2 N_2$$

$$I_2' = I_2 \frac{N_2}{N_2'} = I_2 \frac{N_2}{N_1} = I_2 / k$$

- 物理意义：当用 $N_2' = N_1$ 替代了 $N_2$ ，其匝数增加了 $k$ 倍。为保持磁势不变。次级电流归算值减小到原来的 $1 / k$ 倍。

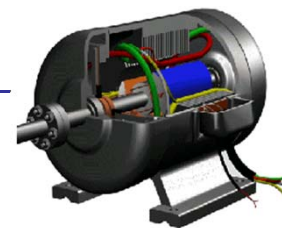
### ➤ 电势的归算

归算前后次级边电磁功率应不变

$$E_2' = \frac{I_2}{I_2'} E_2 = k E_2$$

- 物理意义：当用 $N_2'$ 替代了 $N_2$ ，其匝数增加到 $k$ 倍。而主磁通  $\Phi_m$ 及频率 $f$ 均保持不变，归算后的次级电势应增加 $k$ 倍。





### ➤ 电阻的归算

归算前后铜耗应保持不变

$$r_2' = \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 r_2 = k^2 r_2$$

- 物理意义：当用 $N_2'$ 替代 $N_2$ 后，匝数增加到 $k$ 倍，次级绕组长度增加到 $k$ 倍；次级电流减到为原来的 $1/k$ 倍，归算后的次级绕组截面积应减到原来的 $1/k$ 倍，故归算后的次级电阻应增加到原来的 $k^2$ 倍。（**绕组本身没有变化**）

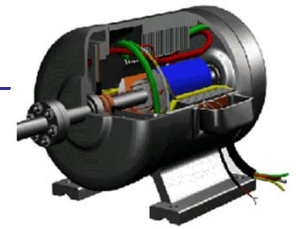
### ➤ 漏抗的归算

归算前后次级漏磁无功损耗应保持不变

$$x_2' = \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 x_2 = k^2 x_2$$

- 物理意义：绕组的电抗和绕组的匝数平方成正比。由于归算后次级匝数增加了 $k$ 倍，故漏抗应增加到 $k^2$ 倍。

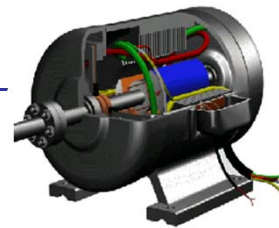




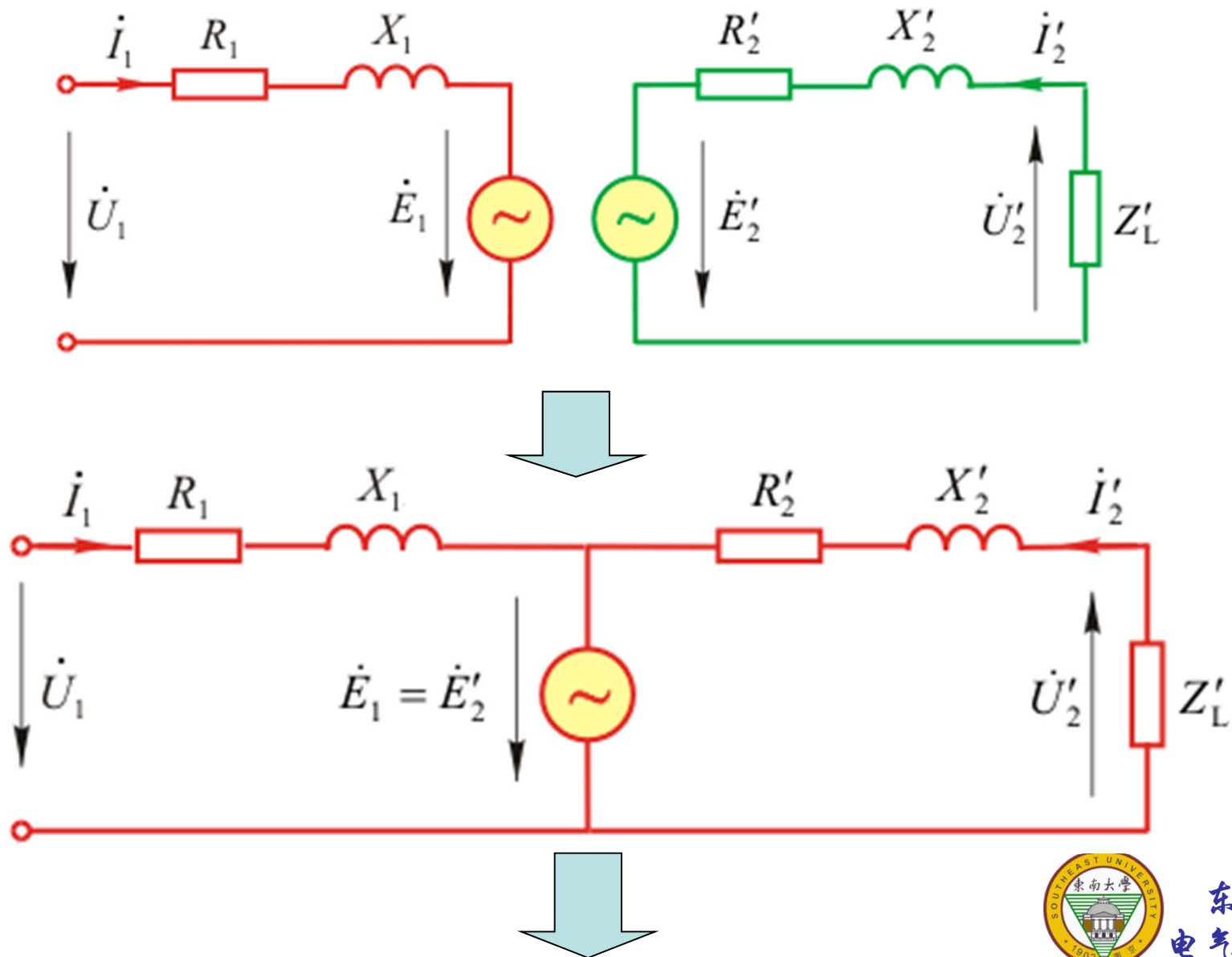
## 折算到一次侧的方程式组

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\
 \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\
 \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \\
 \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_m \\
 -\dot{E}_1 &= \dot{I}_m Z_m \\
 \dot{U}'_2 &= \dot{I}'_2 Z'_L
 \end{aligned} \right\} \leftarrow \begin{aligned}
 \dot{U}'_2 &= k \dot{U}_2 \\
 \dot{E}'_2 &= k \dot{E}_2 \\
 \dot{I}'_2 &= \frac{\dot{I}_2}{k} \\
 Z'_2 &= k^2 Z_2 \\
 Z'_L &= k^2 Z_L
 \end{aligned}$$



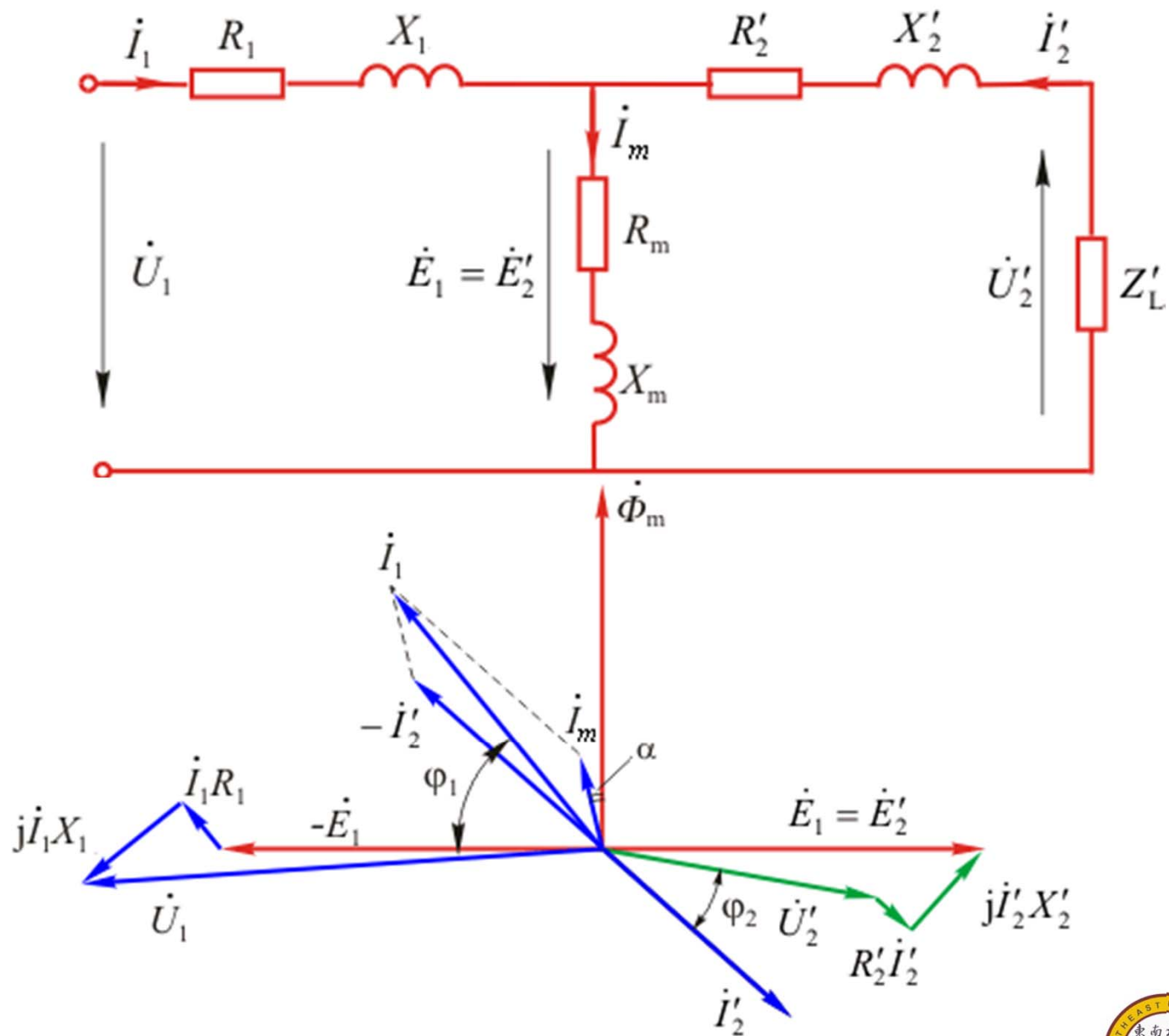
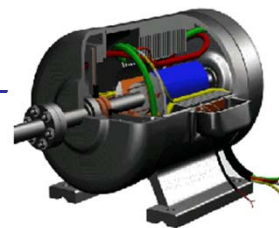


- T形等效电路图



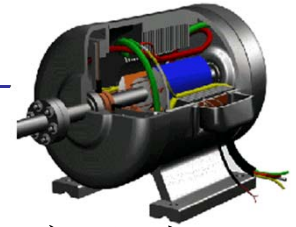


# 变压器的负载运行



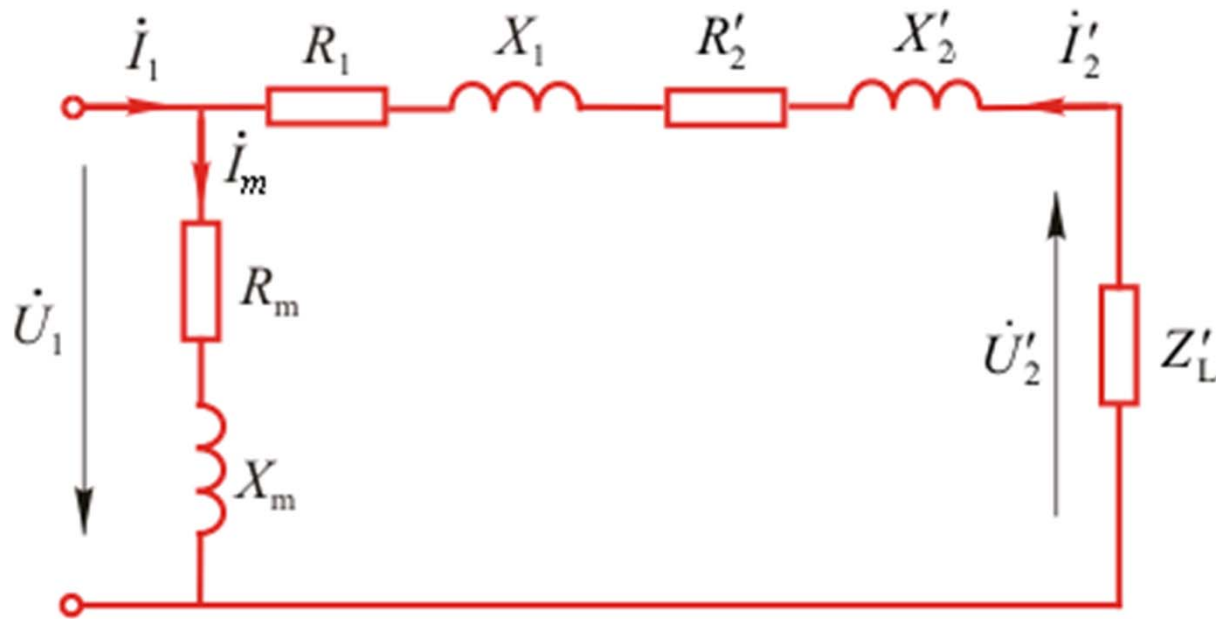
变压器相量图 ( $\cos\varphi_2$  滞后)





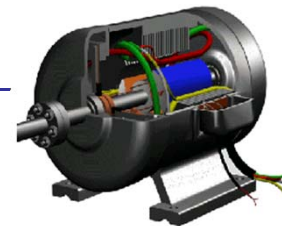
## •近似等效电路

把励磁支路移至端点处。计算时引起的误差不大：变压器的激磁电流(即空载电流)为额定电流的3%-8%，（大型变压器不到1%）。



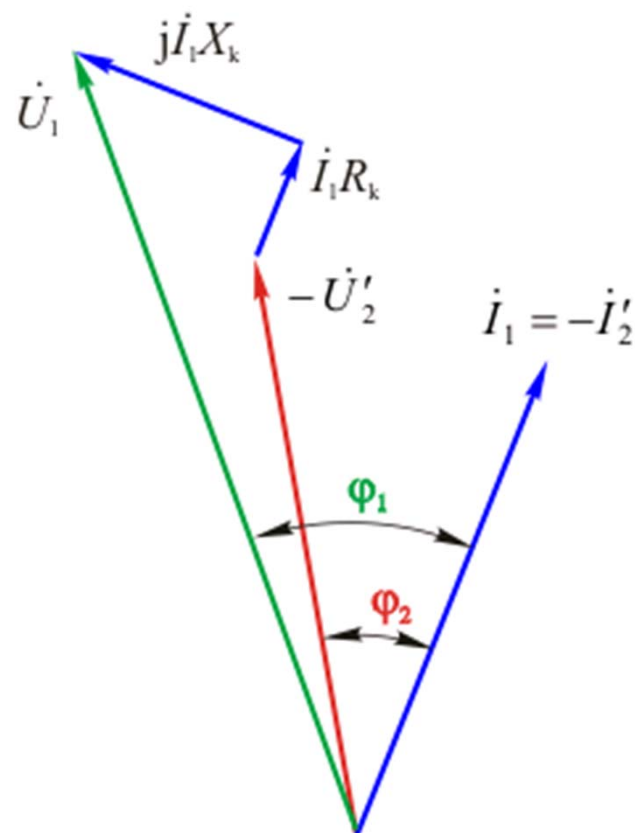
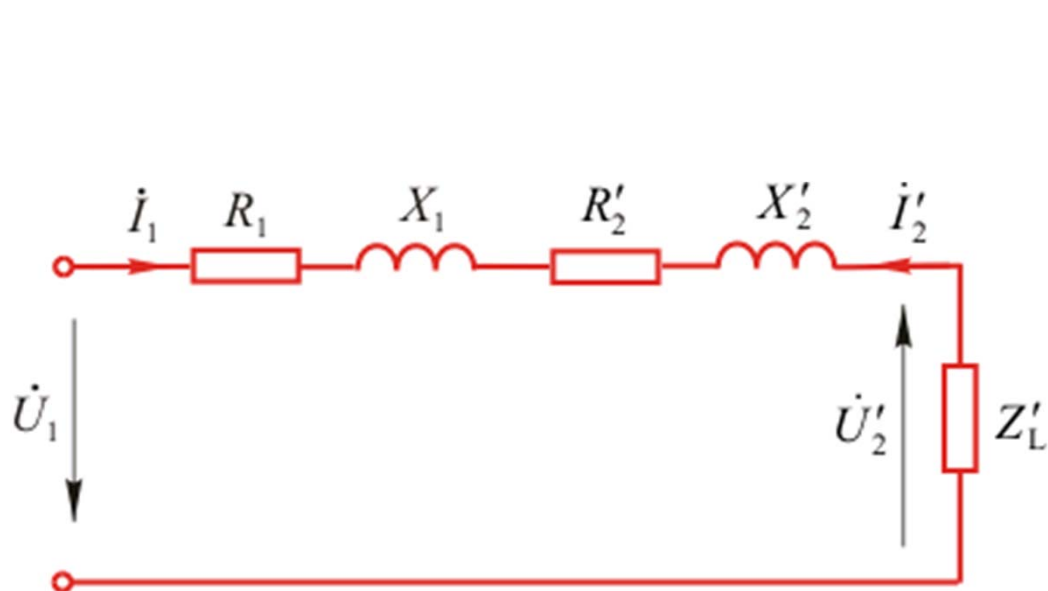
$$\begin{aligned} r_k &= r_1 + r'_2 && \text{短路电阻} \\ x_k &= x_1 + x'_2 && \text{短路电抗} \\ Z_k &= r_k + jx_k && \text{短路阻抗} \end{aligned}$$





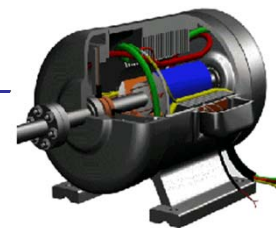
- 简化等效电路

略去励磁电流（支路） 常用于定性分析



简化相量图 $[\cos\varphi_2(\text{滞后})]$





- 定义

- 对各个物理量选一个固定的数值作为基值，取实际值与基值之比称为该物理量的标么值 标么值用下标“\*”

- 基值（采用下标“b”）

电压基值——额定电压

$$U_{1b} = U_{1N}, U_{2b} = U_{2N}$$

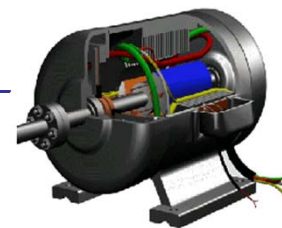
电流基值——额定电流  $I_{1b} = I_{1N}, I_{2b} = I_{2N}$

功率基值——额定容量  $S_b = S_N$

阻抗基值——额定电压与额定电流之商

初级、次级侧各物理量应采用不同基值





- 标么值的优点

1. 计算方便，容易判断计算错误

因为取额定值作为基值，当实际电压为额定电压和实际电流为额定电流时，用标么值计算就作为1。

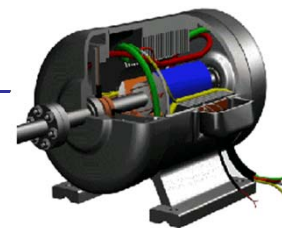
2. 采用标么值计算同时也起到了归算作用

这是由于初级、次级侧分别采用了不同基值，且已包含有变比关系。

$$U_{2*}' = \frac{U_2'}{U_{1b}} = \frac{kU_2}{U_{1N}} = \frac{U_2}{U_{2N}} = \frac{U_2}{U_{2b}} = U_{2*}$$

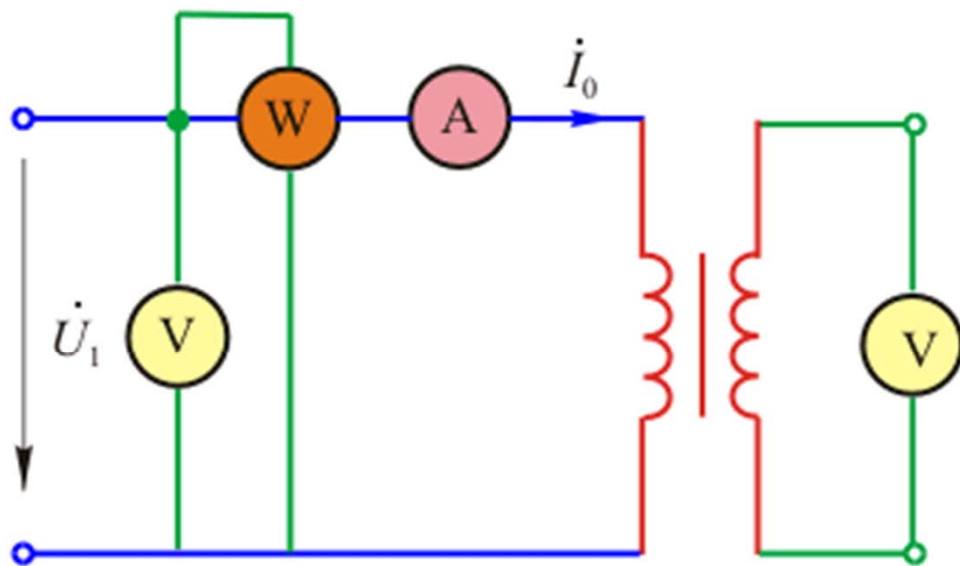
3. 采用标么值更能说明问题



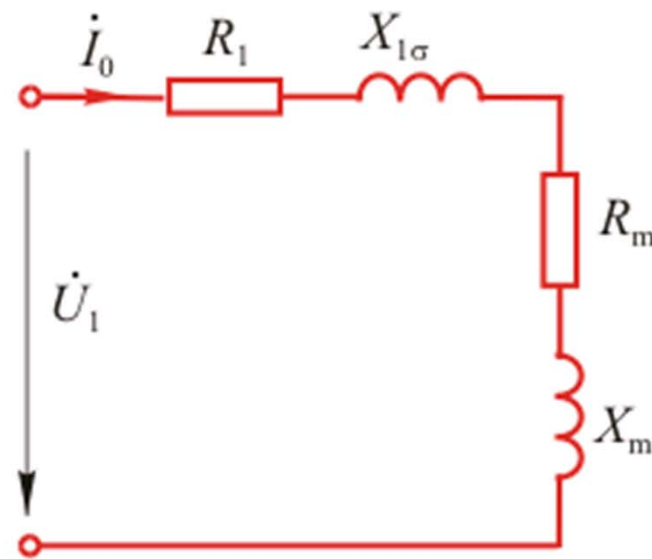


## • 空载实验

测定励磁电阻 $r_m$ 和励磁电抗 $x_m$



接线图



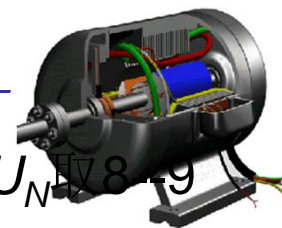
等效电路

单相变压器空载试验

试验可在高压侧测量也可在低压侧测量，视实际测量方便而定。如令高压侧开路，在低压侧进行测量，测得的数据是低压侧的值，计算的激磁阻抗也是归算至低压侧的值。







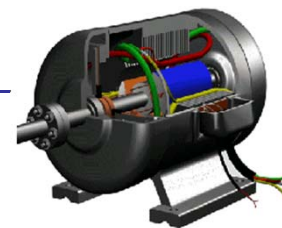
- 通过调压器给变压器供电，调压器输出电压 $U_{10}$ ，从 $1.2U_N$ 到 $0.3U_N$ 取8~9点，每点均测出 $P_0$ ， $I_0$ ， $U_{20}$ 。可得空载特性曲线， $u_0=f(I_0)$
- 激磁参数值随饱和而变化。**为反映变压器运行时的磁路饱和情况，空载试验时应调整外施电压等于额定电压。
- 令 $U_0$ 为外施每相电压， $I_0$ 为每相电流， $P_0$ 为每相输入功率即等于每相的空载损耗。

$$z_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

$$r_0 = \frac{p_0}{I_0^2} = r_1 + r_m \approx r_m$$

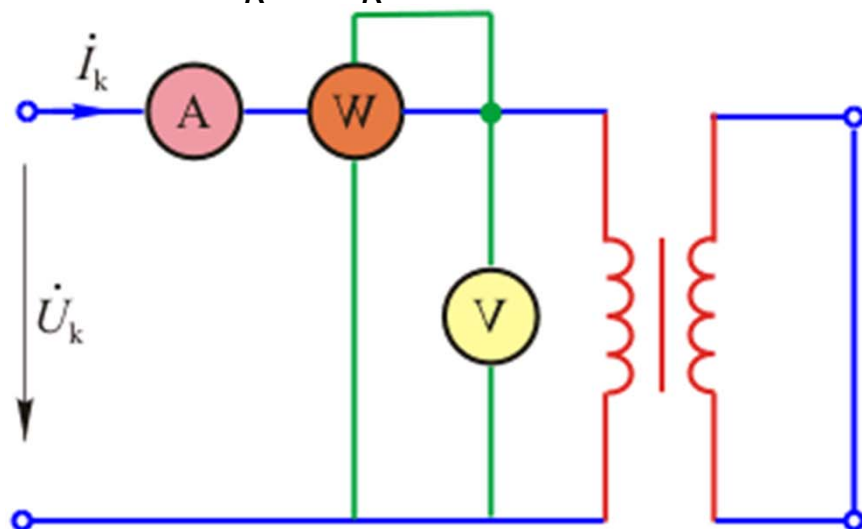
$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = x_1 + x_m \approx x_m$$



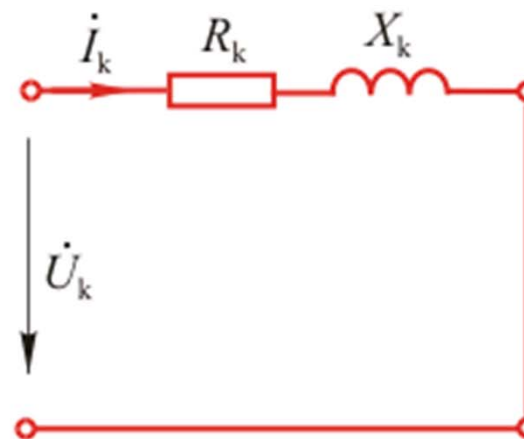


## • 短路实验

计算参数 $r_k$ 和 $x_k$



接线图

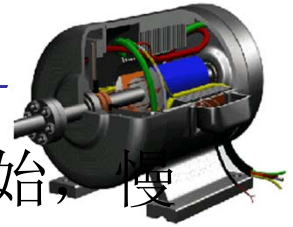


等效电路

单相变压器短路试验

- **短路试验应降低电压进行。**控制短路电流不超过额定值。
- 短路试验可以在高压侧测量而把低压侧短路，也可在低压侧测量而把高压侧短路。**二者测得的数值不同，用标么值计算则相同。**



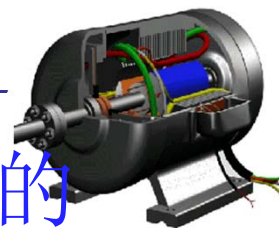


- 试验开始时应注意调压器输出应调到零，然后从0开始，慢慢调节，并监视电流表，使短路电流 $I_k \approx 1.25I_N$ 时停止升压，防止过大电流产生，对变压器不利。
- 记录数据 $U_k$ ， $I_k$ ，从 $1.25I_N$ 到 $0.5I_N$ 测5~6点。由于 $U_k$ 低，铁心中 $\Phi$ 低，故 $P_k$ 中所含铁耗较小，可忽略铁耗，故 $P_k$ 中只含铜耗。
- $U_k$ 表示每相电压， $I_k$ 表示每相电流， $P_k$ 表示每相输入功率即等于每相短路损耗

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2} \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

- 电阻随温度而变化，如短路试验时的室温为 $\theta(^{\circ}\text{C})$ ，按标准规定应换算到标准温度 $75^{\circ}\text{C}$ 时的值。





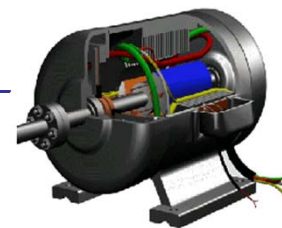
- 短路试验时，使短路电流恰为额定电流的外施电压 $u_k$ ，称为 $u_{kN}$ 。

- 以额定电压百分数表示，称为**短路电压百分数**

$$u_k = \frac{U_{kN}}{U_N} \cdot 100\% = \frac{I_N Z_k}{U_N} \cdot 100\%$$

- 短路电压百分数去掉100%符号，就是短路电压标么值
- $u_k$ 不能太小，也不能太大。 $u_k$ 太大时，变压器空载时电压高，负载时电压压降较多。 $u_k$ 太小时，变压器接额定电压短路时电流太大。





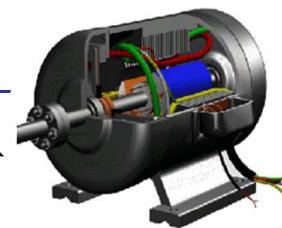
### •电压变化率

**电压变化程度**——由于变压器内部存在着电阻和漏抗，负载时产生电阻压降和漏抗压降，导致次级侧电压随负载电流变化而变化。

设外施电压为额定电压，取空载与额定负载两种情况下的次级侧电压的算术差与空载电压之比定义为电压变化率(又称电压调整率)

$$\begin{aligned}\Delta U\% &= \left( \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \right) \times 100 = \left( \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \right) \times 100 \\ &= \left( \frac{U_{1N} - U'_2}{U_{1N}} \right) \times 100 = (1 - U_{2*}) \times 100\end{aligned}$$





根据简化向量图推导出电压变化率的简化计算公式如下

$$\Delta U = \beta(R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2) \times 100\%$$

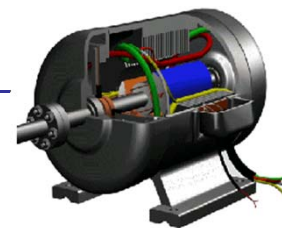
式中， $\beta = I_2 / I_{2N}$  称为负载系数。

注意：

- $\Delta U$ 的大小与短路阻抗的标幺值 $Z_k^*$ （ $R_k^*$ 、 $X_k^*$ ）、负载大小（ $I_2^*$ ）和负载性质（ $\cos \varphi_2$ ）有关；短路阻抗的标幺值 $Z_k^*$ ， $\Delta U$ 越大，负载变化时，负载电压波动较大。因此，从运行角度看，希望 $Z_k^*$ 小些较好。但从限制短路电流大小的角度看， $Z_k^*$ 又不能太小。
- 感性负载时， $\Delta U > 0$ ，二次侧端电压 $U_2$ 随负载电流 $I_2$ 的增大而下降；
- 容性负载时， $\Delta U$ 可能小于0，二次侧端电压可能随负载电流 $I_2$ 的增加而升高。







- 变压器的效率

- 效率：输出功率与输入功率之比
- 输入功率是输出功率与全部损耗之和
- 损耗 $\Sigma p$

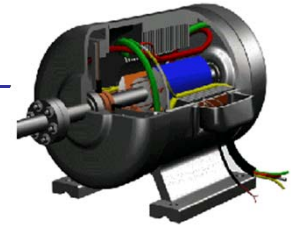
初级绕组铜耗 $p_{cu1}=I_1^2 r_1$

次级绕组铜耗 $p_{cu2}=I_2^2 r_2$

铁芯损耗 $p_{Fe}=I_m^2 r_m$

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Sigma p) = (P_1 - \Sigma p) / P_1$$





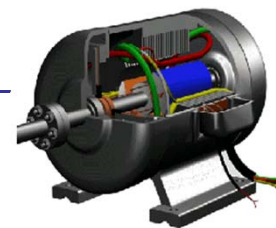
$$\begin{aligned}
 \Sigma p &= I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2' + I_m^2 r_m \\
 &= I_2'^2 (r_1 + r_2') + I_m^2 (r_1 + r_m) \\
 &= \frac{I_2'^2}{I_{2N}'^2} I_{2N}'^2 (r_1 + r_2') + I_m^2 (r_1 + r_m) \\
 &= \beta^2 p_{kN} + p_0
 \end{aligned}$$

$$P_2 = U_{2N} I_2 \cos \theta_2 = \frac{I_2}{I_{2N}} U_{2N} I_{2N} \cos \theta_2 = \beta S_N \cos \theta_2$$

$$P_1 = P_2 + \Sigma p = \beta S_N \cos \theta_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0$$

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos \theta_2}{\beta S_N \cos \theta_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0}$$





- 当负载的功率因数保持不变，效率随负载电流而变化的关系称为效率曲线
- 不变损耗 $p_0$ ——不随负载电流变化
- 可变损耗 $\beta^2 P_{kN}$ ——随负载电流二次方变化

$$p_0 = \beta^2 p_{kN}$$

- 极值条件：  
当可变损耗等于不变损耗时效率达到最大
- 一般 $\beta_m = 0.5 \sim 0.77$

